Archiv f. d. Austausch

Ein Beitrag zur Photometrie periodischer Lichtemissionsvorgänge

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung der Doktorwürde genehmigt von der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Friedrich-Wilhelms-Universität zu Berlin

Von

Horst Köllner

aus Bielefeld

Tag der Promotion: 22. Februar 1937

Tag der mündlichen Prüfung: 24. Juni 1936

786

Ein Beitrag zur Photometrie periodischer Lichtemissionsvorgänge

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung der Doktorwürde genehmigt von
der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Friedrich-Wilhelms-Universität zu Berlin

Von

Horst Köllner

aus Bielefeld

Tag der Promotion: 22. Februar 1937

Tag der mündlichen Prüfung: 24. Juni 1936

Referenten: Prof. Dr. Wehnelt
Prof. Dr. von Laue

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Vorstehende Dissertation ist in der Fachzeitschrift „Das Licht", Beiblatt für „Forschungen und Fortschritte", 7. Jahrgang, 1937, erschienen.

A. Einleitung und Programm der Arbeit

Mit der Entwicklung der modernen Gasentladungslampen und ihrer zunehmenden Bedeutung für die Lichttechnik haben auch die Probleme der heterochromen Photometrie wieder eine stärkere Beachtung erfahren. Während die Grundlagen und Meßmethoden der Photometrie, wie sie an Temperaturstrahlern (mit zeitlich konstanter Emission und kontinuierlichen Spektren) entwickelt und erforscht wurden, sowohl für weiße wie auch für farbige Lichter (1 . . . 4) **) als gesichert anzusehen sind, können bei Gasentladungslampen insofern Bedenken entstehen (5), als die Lichtemission aus wenigen diskreten Spektrallinien besteht, beim Wechselstrombetrieb periodischen Schwankungen unterliegt, die recht ungewöhnliche und „wilde" Kurvenformen des Zeit-Lichtverlaufs zeigen, und außerdem noch periodischen Änderungen der spektralen Zusammensetzung unterliegen kann.

Die Bewertung intermittierenden Lichtes durch das Auge erfolgt im allgemeinen nach dem Talbotschen Gesetz (6, 7, 8), das sich bisher bei allen Prüfungen als richtig und gültig erwiesen hat. Aus den vorliegenden Untersuchungen über dieses Gesetz läßt sich allerdings nicht mit Sicherheit folgern, ob es seine Gültigkeit in vollem Umfange auch für die oben genannten extremen Bedingungen behält. Um die Art der Mittelwertbildung des Auges auch für solche Fälle zu kennen, schien es daher geboten, diese Fragen durch neue Messungen zu klären.

**) Vgl. Literaturübersicht am Schluß der Arbeit.

Die objektive Meßmethode, die für diese Untersuchungen entwickelt wurde, besteht darin, daß der zeitliche Lichtverlauf oszillographisch registriert wird und daß die von der Lichtkurve eingeschlossene Fläche ein objektives Maß für den zu messenden Lichtstrom darstellt. Gleichzeitig mit dieser Registrierung erfolgt eine direkte subjektive photometrische Messung. Die Prüfung des Talbotschen Gesetzes ergibt sich dann aus dem Vergleich der subjektiv gemessenen mit den objektiv erhaltenen Werten.

Das Talbotsche Gesetz wurde in dieser Arbeit sowohl für weißes wie auch für farbiges Licht geprüft. Bei den Messungen an weißem Licht wurden die verschiedenen Lichtkurven mit Sektorenscheiben erzeugt; da diese Lichtverläufe genau bekannt waren, dienten sie gleichzeitig dazu, die Aufnahmeapparatur hinsichtlich frequenzgetreuer und verzerrungsfreier Wiedergabe zu kontrollieren. Nachdem sich die Aufnahmeapparatur, bestehend aus Photozelle, Verstärker und Siemens - Schleifen-Oszillograph, bei den Messungen an weißem Licht bewährt hatte, wurden die Untersuchungen an Leuchtröhren ausgeführt.

Für die subjektiven photometrischen Messungen wurde aus bestimmten Gründen (9) die von M. Pirani (10) vorgeschlagene Filtermethode angewendet. Sie besteht darin, daß das Licht der Vergleichslampe durch ein Filter bekannter spektraler Durchlässigkeit physiologisch der Farbe der zu messenden Lichtquelle angepaßt wird. Die Messung beschränkt sich damit auf einen isochromen Vergleich; und der gesamte, vom Filter durchgelassene Lichtstrom der Vergleichslampe bestimmt sich aus der spektralen Durchlässigkeit des Filters, der spektralen Energieverteilung der Vergleichslichtquelle und der international festgelegten spektralen Hellempfindlichkeitskurve („Augenempfindlichkeitskurve").

B. Bisherige Untersuchungen über den Gültigkeitsbereich des Talbotschen Gesetzes

Das Talbotsche Gesetz lautet in seiner Formulierung nach Helmholtz (11):

„Wenn eine Stelle der Netzhaut von periodisch veränderlichem und regelmäßig in derselben Weise wiederkehrendem Lichte getroffen wird, und die Dauer der Periode hinreichend kurz ist, so entsteht ein kontinuierlicher Eindruck, der dem gleich ist, der entstehen würde, wenn das während einer jeden Periode eintreffende Licht gleichmäßig über die ganze Dauer der Periode verteilt würde."

Da physiologische Gesetze häufig einen beschränkten Gültigkeitsbereich haben (12), ist das Talbotsche Gesetz vielfach nach verschiedenen Gesichtspunkten geprüft worden; es hat sich dabei bisher als gültig erwiesen (12, 13). Als wesentlichste Arbeiten seien hier genannt: Lummer und Brodhun (14), Wiedemann und Messerschmitt (15), J. W. Beams (16), G. N. Stewart (17), Exner (18), Hyde (19), Cady (20). Aus diesen Arbeiten geht hervor, daß das Talbotsche Gesetz sowohl über einen Frequenzbereich bis zu 1778 Hz wie auch bei Lichtblitzen der Dauer 10^{-8} sec für gültig befunden wurde, daß weder die verschiedensten Sektoröffnungen (bis hinab zu 5° und 2°), noch geringe Variationen in den Formen der Lichtblitze Abweichungen bedingten.

Eine neuere Arbeit, in der behauptet wird, daß sich die Gültigkeit des Talbotschen Gesetzes auf einen begrenzten Frequenzbereich beschränke, stammt von E. Haschek (21), der eine neue Theorie über den Sehvorgang (22) entwickelt hat. Aus dieser Theorie folgt, daß das Talbotsche Gesetz bei „genügend kurzen periodischen Lichteindrücken" nicht mehr gilt. Diese Behauptung wurde von Pater Vincenz Frodl experimentell geprüft und bestätigt; hiernach treten die Abweichungen vom Talbotschen Gesetz oberhalb von 1000 Hz auf, bei Dämmerlicht

(Stäbchensehen) erst oberhalb von 10000 Hz. Gegen die Haschekschen Angaben können allerdings insofern Bedenken erhoben werden, als die Grundannahme seiner Theorie (der Reizung der Sehnerven liege ein rein mechanischer Vorgang zugrunde) im Widerspruch zu Messungen von G. v. Studnitz (23) steht, aus denen hervorgeht, daß sowohl der Mechanismus des Stäbchen- wie auch der des Zapfensehens auf einem photochemischen Prozeß beruhen. (Einzelheiten im Literaturverzeichnis.)

Für farbige Lichter ist das Talbotsche Gesetz viel seltener untersucht worden. Wohl die zuverlässigsten Ergebnisse hierüber stammen von Hyde (19). Er sowohl wie Exner (18) geben an, daß sie das Talbotsche Gesetz auch für farbige Lichter für gültig befunden haben.

Wie eingangs schon erwähnt wurde, läßt sich aus den vorliegenden Arbeiten nicht mit Sicherheit folgern, ob auch die extremen Lichtemissionsvorgänge von wechselstromdurchflossenen Gasentladungslampen noch vom Talbotschen Gesetz erfaßt werden; somit schien eine neue Untersuchung dieser Fragen gerechtfertigt.

C. Untersuchungen über das Talbotsche Gesetz an Temperaturstrahlern und an wechselstromdurchflossenen Gasentladungslampen

I. Apparatur

1. Mechanische Anordnung der Apparatur

Bei den subjektiven Messungen an weißem Licht wurde intermittierendes mit konstantem Licht verglichen; hierbei wurde die aus der Abb. 1 erkennbare Anordnung benutzt.

Die in ein Lampengehäuse eingeschlossene Lichtquelle (Osram-Kinolampe mit eingebautem Hohlspiegel, 15 V/900 W) wird durch einen Kondensor auf eine Opalglasscheibe abgebildet. Zwischen den beiden Linsen des Kondensors ist der Strahlengang

nahezu parallel, und hier rotiert die Sektorscheibe vor einer feststehenden Schablone, deren Ausschnitt den Sektoren einer bestimmten Scheibe gleicht. Der Schablonenausschnitt ist so justiert, daß die einzelnen Sektoren jener Scheibe genau mit ihm zur Deckung gebracht werden können bzw. daß er, wenn sich die Scheibe um eine Sektorenbreite weitergedreht hat, gerade völlig verdunkelt wird. Die Anordnung der Sektorscheibe zwischen den Kondensorlinsen bewirkt eine gleichmäßige Aufhellung oder

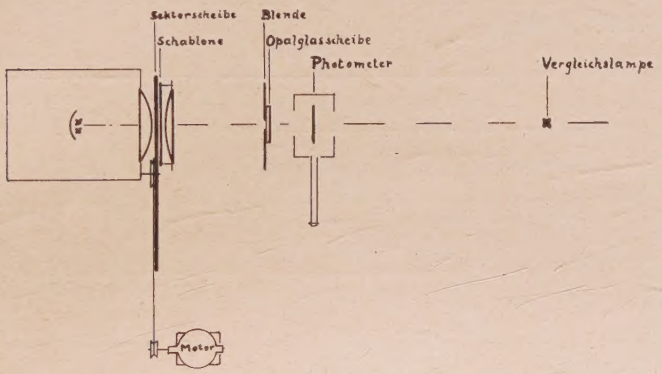


Abb. 1. Skizze der Versuchsanordnung

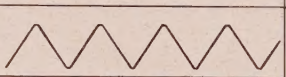
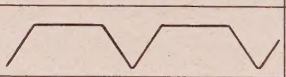
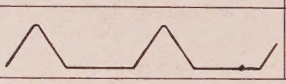
Verdunkelung des Bildes der Lichtquelle; der vorübergleitende Sektor wirkt also als Aperturblende.

Die bereits erwähnte Scheibe hat zehn Ausschnitte von 18°, die gleichmäßig über die Peripherie verteilt sind. Scheibe und Schablone zusammen lassen also die Lichtintensität des Bildes linear ansteigen und wieder abfallen. Man erhält, wenn man den Verlauf der Lichtintensität des Bildes als Ordinate über der Zeitachse aufträgt, eine dreieckförmige Lichtkurve. Da hier der Schablonenausschnitt etwas kleiner ist (17°) — damit sich auch bei verschieden großen Sektorausschnitten immer die gleiche Maximalintensität ergibt —, fehlt den Dreiecken eine kleine obere Spitze; ebenso befindet sich zwischen

zwei benachbarten Dreiecken ein Abschnitt von gleicher zeitlicher Größe (vgl. Abb. 7). Diese kleinen Strecken erweisen sich später noch als empfindliche Anzeiger für die Frequenzabhängigkeit der Aufnahmeapparatur (vgl. S. 16 und Abb. 7).

Die einzelnen Daten der verschiedenen benutzten Sektorscheiben sind aus Tabelle I ersichtlich. Die Konstanz der Drehzahl der Scheiben wird mittels eines Stroboskop-Streifens kontrolliert, der auf dem äußeren Rand der Scheibe aufgeklebt ist und mit einer wechselstromdurchflossenen Glimmlampe beleuchtet wird.

Tabelle I

Scheibe	Gestalt der Lichtkurve	Zahl der Helligkeitseindrücke pro Umdrehung	Schwächungsverhältnis
Nr. 1		10	0,5
Nr. 2		5	0,75
Nr. 3		5	0,25

Das auf der Opalglasscheibe aufgefangene Bild der Lichtquelle dient seinerseits wieder als Lichtquelle für das Photometer oder, wenn es sich um die Kontrolle der Aufnahmeapparatur handelt, für die Photozelle. Vor der Opalglasscheibe befindet sich noch eine Blende, die nur die Wendeln der Lampe, nicht aber Teile des Kolbens oder der Halterung zur Abbildung kommen läßt.

Die ganze bisher beschriebene Anordnung ist auf einer optischen Bank montiert. Auf der anderen Seite vom Photometer, das während der Messungen fest steht, ist auf einem Wagen die Vergleichslampe befestigt, eine geeichte Normallampe, die ebenso wie die Kinolampe mit Gleichstrom betrieben wird. Das Photometer enthält einen Lummer-Brodhunschen Kontrastwürfel.

2. *Die Aufnahmeapparatur*

a) Die Photozelle

Da die Aufzeichnung der Lichtkurven mit einem Schleifenoszillographen erfolgen sollte, wurde zunächst erwogen, eine Selen-Sperrschichtzelle zu verwenden, die man direkt an die Schleife hätte anschließen können. Einige Vorversuche ergaben jedoch, daß diese Zellenart hier nicht gebraucht werden konnte; man hätte nämlich die Zelle zusammen mit der empfindlichsten Schleife verwenden müssen (1 mm Ausschlag pro 0,04 mA), und die konnte wegen ihrer geringen Eigenfrequenz (in Luft: $f_L = 2000$ Hz) nicht in Betracht kommen. In Verbindung mit der Normalschleife ($f_L = 5500$ Hz, 1 mm pro 1,54 mA) ließ sich die Zelle ebenfalls nicht gebrauchen; man hätte die Beleuchtungsstärke auf der Zelle so sehr erhöhen müssen, daß man nicht mehr im linearen Teil der Licht-Strom-Charakteristik geblieben wäre. Bei großen Beleuchtungsstärken ändert diese Charakteristik sehr stark ihre Neigung (24, 25); und der lineare Teil reicht bei den hier betrachteten Zellen bis zu etwa 2 mA. So wurde schließlich eine Alkalizelle gewählt, deren Ströme in geeigneter Weise verstärkt wurden.

Die benutzte Zelle war eine Vakuumzelle mit Cäsiumoxydkathode, wie sie von Sewig (26) beschrieben worden ist; ihre spektrale Empfindlichkeitsverteilung ist von Kluge (27) mitgeteilt worden und zeigt den Verlauf der Abb. 2.

Dieser Verlauf der spektralen Empfindlichkeit weicht zwar beträchtlich von der Augenempfindlichkeitskurve ab, erscheint also für photometrische Zwecke nicht besonders gut geeignet; trotzdem wurde die Zelle beibehalten, da sie auch bei starker Belastung vollkommen einwandfrei arbeitete, während verschiedene zur Verfügung stehende Rb-, K- und Cs-Zellen in solchen Fällen veränderliche, abfallende Stromwerte ergaben. Außerdem blieben diese Zellen mit ihrer Empfindlichkeit z. T. erheb-

lich hinter derjenigen der hier verwendeten zurück, die — nach Angaben des Herstellers, Dr. Flechsig, Berlin — 65 μA pro Lumen ergab bei einer Wolframlampe der Farbtemperatur 2600° K.

Die von der Augenkurve stark abweichende Empfindlichkeitsverteilung der Photozelle kann bei den hier ausgeführten Messungen insofern eine Fehlerquelle darstellen, als sich die spektrale Zusammensetzung des emittierten Lichtes innerhalb einer Halbwelle etwas verändert. Die Intensität der einzelnen,

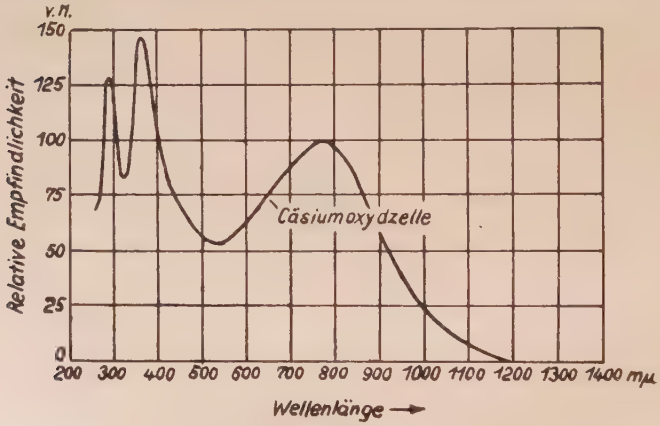


Abb. 2. Spektrale Empfindlichkeitsverteilung der Cäsiumoxydzelle

in einer Entladung angeregten Linien variiert mit der Stromstärke, und zwar für jede Linie in anderer Weise (28 . . . 35): das bedeutet für ein Entladungsrohr, wenn es an Wechselspannung liegt, eine Farbänderung in jeder Halbwelle. Beispielsweise ergaben sich bei den ersten Messungen an Natriumröhren mit ungefiltertem Licht Abweichungen zwischen den Resultaten der subjektiven und objektiven Methode. Diese scheinbare Ungültigkeit des Talbotschen Gesetzes konnte aber behoben werden, wenn das auf die Zelle gelangende Licht gefiltert wurde (über das Filter vgl. S. 24). Die Natriumröhren

haben neben den D-Linien nur noch im Ultraroten eine nennenswerte Emission (36), und die zeitliche Verschiebung des Verlaufs der Intensität der einzelnen Linien spielt sich hier zwischen den D-Linien und den Linien bei 8195/8183 Å ab. Der Fehler wurde hier deshalb besonders deutlich, weil die Zelle im Ultraroten wesentlich empfindlicher ist als im Sichtbaren (Abb. 2). Da aber eine genaue Angleichung der Zellenkurve an die Augenkurve eine zu starke Dämpfung der Gesamtempfindlichkeit im Gefolge gehabt hätte [man vgl. z. B. H. König (37)], wurde hier von Fall zu Fall das passende Filter ausgewählt.

Die Zelle war in einem Eisengehäuse untergebracht, das zusammen mit der Abschirmung des Verbindungskabels zum Verstärker geerdet wurde.

b) Der Verstärker

Die Abb. 3 zeigt das Schaltbild des verwendeten Verstärkers, eines zweistufigen reinen Widerstands-

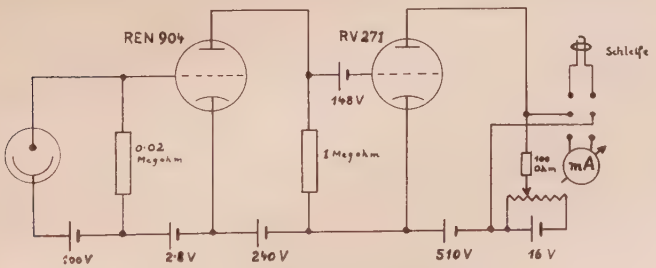


Abb. 3. Schaltbild des Verstärkers

verstärkers, dessen Betriebsdaten der Zeichnung zu entnehmen sind. Das Endrohr (RV 271) hatte eine Anodenleistung von 120 Watt und gab einen maximalen Strom von 235 mA, von denen die letzten 100 mA, die zur vollen Ausnutzung der Oszillographenschleife nötig waren, als nahezu geradliniger Aussteuerbereich benutzt wurden. Der Arbeitspunkt (135 mA) wurde mit der Gittervorspannung des

Endrohres genau eingestellt, und dieser Strom wurde dann wieder kompensiert, so daß die Schleife oder das Milliamperemeter, die beide 1 Ohm Widerstand hatten, vom Nullpunkt aus arbeiteten (vgl. Abb. 4).

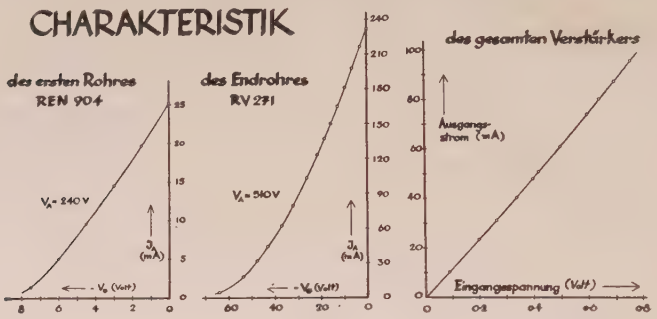


Abb. 4. Charakteristik der Röhren und des Verstärkers

Bei der Kontrolle der Frequenzabhängigkeit der Apparatur hatte sich gezeigt, daß der Ableitwiderstand des Photozellenkreises relativ klein gehalten werden mußte, damit eine genaue Wiedergabe der Kontrollfigur gewährleistet war; bei größeren Widerständen wiesen die Dreiecke runde, unscharfe Ecken auf. Die Verstärkung ergab sich damit zu 130 mA Ausgangsstrom pro 1 Volt Spannungsänderung im Eingang. Die Empfindlichkeit des Aggregates Photozelle-Verstärker betrug 0.055 mA pro Lux (Wolframlampe der Farbtemperatur 2360° K.).

c) Die Oszillographenschleife

Für Oszillographenschleifen gilt ganz allgemein, daß die Stromempfindlichkeit (und damit der Ausschlag auf dem Registrierstreifen) um so kleiner ist, je höher die Eigenfrequenz liegt. Bei den vorliegenden Untersuchungen mußte ein bestimmter Frequenzbereich erfaßt werden, anderseits durfte die Empfindlichkeit eine gewisse Grenze nicht unterschreiten (vgl. S. 15); daher konnten von den zur

Verfügung stehenden Schleifen die hochfrequente (Type II, f_L = 11 000 Hz, 0,24 mm Ausschlag pro 1 mA) wegen ihrer geringen Empfindlichkeit und die hochempfindliche (Type V, f_L = 2000 Hz, 25 mm pro 1 mA) wegen ihrer niedrigen Eigenfrequenz nicht verwendet werden. Es wurde die Normalschleife (Type I) gewählt, die pro 1 mA einen Ausschlag von 0,65 mm liefert, die Eigenfrequenz f_L = 5500 Hz und einen Widerstand von 1 Ohm hat.

Das mit einer Schleife erfaßbare Frequenzgebiet ist aus Abb. 5 zu erkennen, die einer Arbeit von W. Hofmann (38) entnommen ist. Sie zeigt für verschiedene Werte des Dämpfungsgrades a den Verlauf des Abbildungsmaßstabes M (Verhältnis der Amplituden der ausgeführten Schwingung und der aufgedrückten Kraft) in Abhängigkeit von $\varkappa$ (= f/f_0, wobei f die Erregerfrequenz ist und f_0 die Eigenfrequenz bei fortgedachter Dämpfung). Für den optimalen Wert a = 0,7 (= $\sqrt{0{,}5}$) sieht man, daß

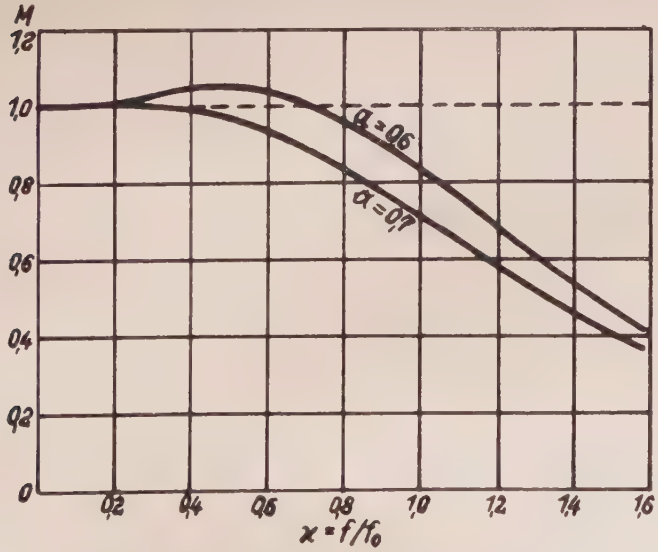


Abb. 5. Beziehung zwischen Abbildungsmaßstab und Frequenzbereich bei Oszillographenschleifen

man innerhalb einer Ungenauigkeit von 2% nur bis $\varkappa = 0{,}4$ messen kann. Bei der Normalschleife ist $f_0 = 2750$ Hz; das bedeutet, daß Vorgänge, deren Frequenz größer als $0{,}4 \times 2750 = 1100$ Hz ist, mit mehr als 2% Fehler registriert werden.

Daß bei der zur Aufzeichnung der Lichtvorgänge benutzten Schleife Nr. 40 der Dämpfungsgrad dem optimalen Wert sehr nahekommt, erkennt man aus Abb. 6, a und b. In beiden Fällen waren drei Schleifen (Type I) hintereinandergeschaltet; bei a wurden 38 mA abgeschaltet, bei b wurde eine Dreieckskurve aufgenommen. Der Einschwingvorgang (am linken Rand von a) vollzieht sich bei Schleife 40 innerhalb von $0{,}4 \cdot 10^{-3}$ sec (2 mm im Oszillogramm bei 5 m/sec Registrierstreifengeschwindigkeit), Schleife 39 braucht etwa das Doppelte und Schleife 38 das Zehnfache dieser Zeit. In Abb. 6b

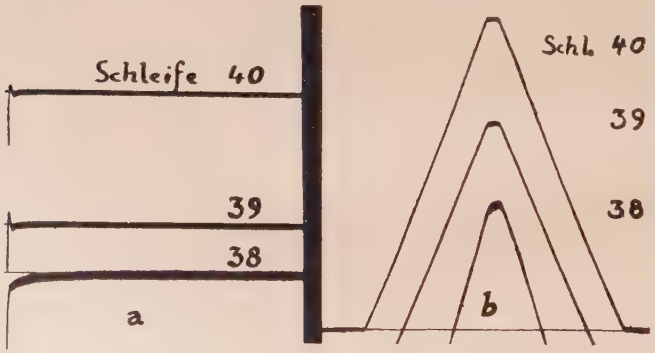


Abb. 6. Dämpfungsverhältnisse der drei Schleifen des Typs I

wird die obere kleine wagerechte Strecke von Schleife 40 als wagerecht, von Schleife 39 schwach und von Schleife 38 stark geneigt wiedergegeben.

Schleife 40 diente zur Aufzeichnung der Lichtvorgänge, sie wurde an den Ausgang des Verstärkers gelegt. Schleife 38 diente wegen ihrer ungünstigen Dämpfung zur Registrierung der Stromkurven, die die wenigsten Unstetigkeiten im Verlauf zeigten; mit

Schleife 39 wurde der Verlauf der Spannung, die am Entladungsrohr liegt, aufgenommen. Zu allen drei Kurven wurden außerdem die Null-Linien aufgenommen. Die Geschwindigkeit des Registrierstreifens betrug 5 m/sec; eine Wechselstromperiode hat auf der Aufnahme eine Länge von 10 cm.

II. Genauigkeit der Methode, Kontrolle der Aufnahmeapparatur

Bevor die Apparatur zu Meßzwecken verwendet wurde, waren durch eine Reihe von Versuchen ihre Genauigkeitsgrenzen und ihre Leistungsfähigkeit festgelegt worden. Die Genauigkeit der Meßmethode hängt von verschiedenen Faktoren der Aufnahmeapparatur ab. Die Maximalamplituden der registrierten Kurven lagen in der Größenordnung von 60 mm, weil das Endrohr nicht bis zum Sättigungsstrom, sondern nur über etwa 95 mA ausgesteuert wurde. Die Größe der Lichtflächen der einzelnen Halbwellen lag zwischen 12 und 15 qcm. Die Unsicherheit des Planimetrierens betrug durchschnittlich 0,1 qcm; damit diese Ungenauigkeit unter 1% blieb, mußten die Flächen größer als 10 qcm sein, und darum konnte hier nicht die hochfrequente Schleife (Type II) gebraucht werden (vgl. S. 13). Die Planimeterwerte sind bei den Messungen also mit einer Unsicherheit von etwa 0,8% behaftet. Eine weitere kleine Ungenauigkeit kann eventuell dadurch hinzukommen, daß die Charakteristik des Verstärkers nicht ganz exakt geradlinig ist (vgl. Abb. 4). Ein solcher Fehler war mit Sicherheit allerdings nur bei den Dreieckskurven festzustellen, während sich beim Vergleich einer direkt aufgenommenen Sinuswelle mit einer vom Verstärker wiedergegebenen eine Abweichung ergab, die hart an der Genauigkeitsgrenze des Planimeters lag. Man wird bei der Messung der Flächen mit dem Planimeter hier also mit einem Fehler in der Größenordnung von 1% zu rechnen haben.

Die Unsicherheit des isochromen Helligkeitsvergleichs an farbigen Lichtquellen nach der Filtermethode wird mit 2% angegeben (11, 39). Das deckt sich mit neueren Ergebnissen von Weigel (40) für den quasi-isochromen Vergleich (Kleinstufen-Methode), der den hier ausgeführten Untersuchungen sicher sehr nahekommt. Da die Lichtstärke von Leuchtröhren momentanen Schwankungen unterliegen kann (z. B. durch plötzliche Änderung des Brennflecks an der Kathode), wird sich die Unsicherheit noch etwas erhöhen. Beim Vergleich der subjektiv gemessenen Werte mit den objektiv registrierten wird man also mit einer Ungenauigkeit bis zu 4% zu rechnen haben.

Für die Messungen an weißem Licht ist maßgebend, daß man mit dem Lummer-Brodhunschen Kontrastwürfel mit einer größeren Anzahl gleichwertiger Ablesungen bis auf 0,3% (41), nach Walsh (42) sogar auf 0,2% genau messen kann. Beim Vorhandensein geringer Farbenunterschiede erhöht sich die photometrische Unsicherheit schon merklich (43). Damit erklärt sich die in den Tabellen II, III und IV (S. 19) auftretende Ungenauigkeit, die den Wert 0,3 manchmal überschreitet, daraus, daß die Kinolampe bei verschiedenen Beleuchtungsstärken mit Unterspannung betrieben werden mußte. Beim Wert 2,5 Lux kommt hinzu, daß hier überhaupt die photometrische Meßgenauigkeit kleiner ist (43, 44, 45).

Zur Kontrolle der Aufnahmeapparatur diente in der Hauptsache die mit der Sektorscheibe erzeugte Dreieckskurve (Abb. 7). Bei der Prüfung der Frequenzabhängigkeit wurden Oszillogramme bei geringer Drehzahl der Sektorscheibe verglichen mit Aufnahmen bei hoher Drehzahl, wobei die Einstellungen des Verstärkers und der Lichtstrom der Kinolampe konstant gehalten wurden. Es ergab sich, daß die Größen der von den Dreiecken eingeschlossenen Flächen innerhalb der Meßgenauigkeit (1%) im reziproken Verhältnis zu den entsprechen-

den Drehzahlen der Scheibe und im direkten zu den verschiedenen Geschwindigkeiten des Registrierstreifens standen und daß die Amplituden gleich waren (vgl. Abb. 7). Eine merkliche Änderung der

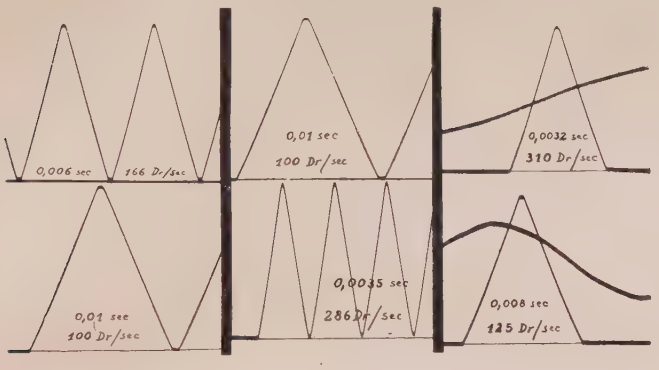


Abb. 7. Dreieckförmige Lichtkurven verschiedener Frequenz

Kontrollaufnahme (Abrundung der kleinen wagerechten Strecke)*) zeigte sich erst oberhalb von etwa 250 Dreiecken pro sec. Bei 200 Dreiecken pro sec ist auf Grund einer Fourier-Analyse der Lichtkurve die Frequenztreue der Apparatur bis weit über 1000 Hz sichergestellt.

III. Messungen und Ergebnisse

1. Weißes Licht

Die Messungen an weißem Licht wurden in folgender Weise ausgeführt. Zuerst wurde bei ruhendem Sektor und voll ausgeleuchteter Schablone eine Messung gemacht, indem die Versuchsperson die Vergleichslampe in geeignete Entfernung vom Photometer brachte. (Zu jeder Messung gehören bei allen subjektiven Vergleichen in dieser Arbeit fünf hintereinander erfolgende, gleichwertige Ablesungen.) So-

*) Diese Feinheiten sind in Abb. 7 infolge des kleinen Maßstabes der Reproduktion nicht genau erkennbar.

dann wurde die Sektorscheibe in Rotation versetzt, und nachdem die Flimmergrenze erreicht war, wurden bei einzelnen diskreten Frequenzwerten wieder Vergleiche hergestellt. Aus der Messung bei ruhendem Sektor und aus ihrem bekannten Schwächungsverhältnis kann man dann die zu erwartenden Werte der Messung mit rotierender Scheibe berechnen und mit den tatsächlich gemessenen vergleichen.

Bei jeder Meßreihe wurde in beiden Richtungen gemessen: mit wachsender und mit abnehmender Frequenz. Der Frequenzbereich umfaßte etwa 40 bis 200 Lichteindrücke pro sec, im Durchschnitt wurde an zehn verschiedenen Stellen gemessen, und die Messungen frequenzaufwärts und -abwärts erfolgten nicht unmittelbar hintereinander. Bei jeder der drei benutzten Scheiben wurde ferner noch die Beleuchtungsstärke variiert, die auf dem Photometerschirm herrschte; es wurde bei folgenden Werten gemessen: 2,5; 10; 25; 50; 75; 150 Lux. Alle subjektiven Messungen wurden von vier Beobachtern ausgeführt, die sehr geübt im Photometrieren sowohl weißen wie auch farbigen Lichtes waren, die normale spektrale Hell- und Farbenempfindlichkeit hatten. In ihren Messungen traten keine systematischen Unterschiede auf. Damit wurde das Talbotsche Gesetz hinsichtlich dreier Parameter geprüft: des zeitlichen Verlaufs der Helligkeitseindrücke, ihrer Frequenz und ihrer Helligkeit selbst. Die große Zahl der Messungen ist in den folgenden Tabellen geordnet.

Die Tabellen II, III und IV enthalten für jede Scheibe einzeln die Meßwerte in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke und den Frequenzwerten. In der ersten Spalte steht die Zahl der Lichtwechsel pro sec, in den folgenden die Meßwerte, bezogen auf den berechneten Sollwert, der gleich 100 gesetzt war; neben den Meßwerten sind noch ihre Gewichte angegeben, d. h. die Zahl der Einzelablesungen, aus denen der Meßwert gemittelt wurde.

Tabelle II

Scheibe Nr. 1

n	10 Lux		25 Lux		50 Lux		150 Lux		Summe	
35	99,9	36			100,2	7	100,0	5	100,0	48
40	100,5	55	100,3	21	100,5	87	99,7	15	100,4	178
45	99,8	51			99,7	58	99,2	66	99,5	175
50	100,3	46	100,3	21	100,8	20	99,6	11	100,3	98
60	99,8	49			100,7	104	99,1	65	100,0	218
70					101,0	15			101,0	15
80					100,9	60			100,9	60
90	99,6	43			100,3	64	99,5	46	99,8	153
100					100,5	75			100,5	75
110					101,1	15			101,1	15
120	99,8	41			100,5	105	99,2	49	100,0	195
150	99,8	55			100,7	45	99,3	50	99,7	140
180	99,4	48			99,9	44	99,7	48	99,7	140
210	99,6	54			99,9	43	99,7	53	99,7	150
	99,9	468	100,3	42	100,4	742	99,4	408	100,0	1660

Da sich in den Tabellen in keinem Falle eine Abhängigkeit zeigte, wurde für jede Scheibe sowohl über alle Beleuchtungsstärken wie über alle Frequenzen summiert; diese Werte stehen jeweils in der letzten Spalte bzw. Zeile der Tabellen II, III

Tabelle III

Scheibe Nr. 2

n	10 Lux		50 Lux		75 Lux		Summe	
30	99,6	41					99,6	41
37,5	99,7	20	99,6	40	100,3	41	99,9	101
45	99,6	45	100,0	47	100,8	40	100,1	132
52,5	99,9	26					99,9	26
60	99,6	42	99,5	41	100,8	20	99,8	103
75	99,4	44	100,0	42	100,7	40	100,2	126
90	99,5	44	99,7	42	101,0	20	99,9	106
105	99,5	46	99,4	40	100,6	40	99,8	126
120	99,5	40	99,5	40	100,8	40	99,9	120
135	99,9	47	99,3	40			99,6	87
150	99,6	37	99,4	46			99,5	83
	99,7	432	99,6	378	100,7	241	99,9	1051

Tabelle IV

Scheibe Nr. 3

n	2,5 Lux		10 Lux		25 Lux		50 Lux		Summe	
37,5	101,3	40	99,8	21	99,0	40	99,0	15	100,0	116
41,7	101,3	40	99,9	40	99,2	40	99,7	26	100,1	146
50	101,3	40	100,1	40	98,8	40	99,0	45	99,8	165
62,5			99,9	45			99,2	40	99,6	35
75	101,5	41	99,9	42	99,5	40	99,4	45	100,0	168
87,5			99,7	42			99,5	45	99,6	87
100	101,3	40	99,8	40	99,5	40	99,5	40	100,0	160
112,5			99,9	40			99,5	43	99,6	83
125	101,4	40	100,0	42	99,5	40	99,2	46	100,0	168
150			100.2	45			99,1	45	99,7	90
	101,4	241	99,9	397	99,2	240	99,3	390	99,9	1268

und IV. Sie wurden in den Tabellen V und VI nochmals zusammengestellt; und hier erkennt man, daß sich auch hinsichtlich der verwendeten Kurvenformen keine Abhängigkeit zeigt. Das Ergebnis dieser Messungen ist also:

Tabelle V

Scheibe Nr. 1			Scheibe Nr. 2			Scheibe Nr. 3		
n	%	Gew.	n	%	Gew.	n	%	Gew.
35	100,0	48	30	99.6	41	37,5	100,0	116
40	100,4	178	37,5	99,9	101	41,7	100,1	146
45	99,5	175	45	100,1	132	50	99,8	165
50	100,3	98	52,5	99,9	26	62,5	99,6	85
60	100,0	218	60	99,8	103	75	100,0	168
70	101,0	15	75	100,2	126	87,5	99.6	87
80	100,9	60	90	99,9	106	100	100,0	160
90	99,8	153	105	99,8	126	112,5	99,6	83
100	100,5	75	120	99.9	120	125	100,0	168
110	101,1	15	135	99.6	87	150	99,7	90
120	100,0	195	150	99,5	83			
150	99,7	140						
180	99,7	140						
210	99,7	150						
	100,0	1660		99,9	1051		99,9	1268

Tabelle VI

Lux	Scheibe 1	Scheibe 2	Scheibe 3	Summe
2,5			101,4 / 241	101,4 / 241
10	99,9 / 468	99,7 / 432	99,9 / 397	99,8 / 1297
25	100,3 / 42		99,2 / 240	99,4 / 282
50	100,4 / 742	99,6 / 378	99,3 / 390	99,9 / 1510
75		100,7 / 241		100,7 / 241
150	99,4 / 408			99,4 / 408
	100,0 / 1660	99,9 / 1051	99,9 / 1268	99,9 / 3979

Oberhalb der Verschmelzungsfrequenz konnte in den hier gemessenen Bereichen im Rahmen der Meßgenauigkeit keinerlei Abweichung vom Talbotschen Gesetz hinsichtlich eines der drei Parameter oder des Zusammenwirkens von zweien von ihnen festgestellt werden.

Außer diesen Messungen an weißem Licht wurden noch einige orientierende Versuche darüber angestellt, wie das Auge intermittierende Lichteindrücke bewertet, die noch nicht zu einem einheitlichen Eindruck verschmolzen sind. Soweit die nicht sehr zahlreichen Messungen, die in diesem Falle infolge der schwierigen und ermüdenden Ablesungen sicher mit einer beträchtlichen Unsicherheit behaftet sind, ein qualitatives Ergebnis erkennen lassen, kann man sagen, daß das Auge unterhalb der Flimmergrenze intermittierendes Licht als heller empfindet, als es tatsächlich ist. Dieser Befund wird durch einige Beobachtungen von U. Ebbecke (46) und durch eine Bemerkung von Helmholtz (47) bestätigt.

2. *Leuchtröhren*

Bei den Messungen an Leuchtröhren wurde die aus Abb. 8 erkennbare Versuchsanordnung benutzt. L bezeichnet das Leuchtrohr, Z die Photozelle in ihrem Gehäuse mit dem Filter F davor (repräsentiert die Aufnahmeapparatur), S ist eine Spiegelglasscheibe, die einen Teil des Lichtes in das Photometer Ph reflektiert, von dem hier nur die Auffangscheibe μ und das Okularrohr O gezeichnet sind.

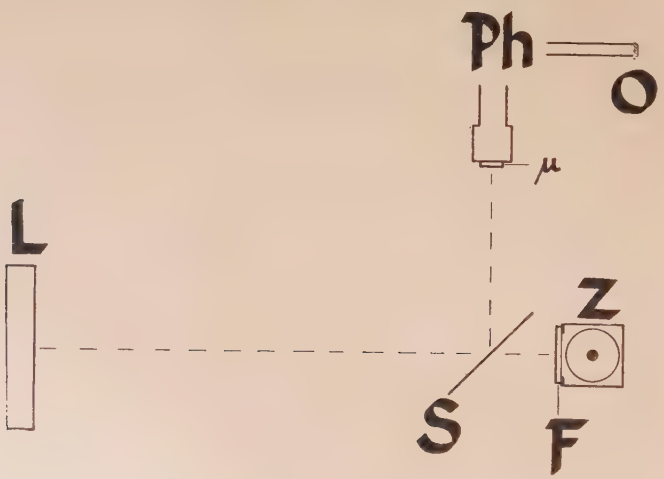


Abb. 8. Versuchsanordnung bei der Leuchtröhrenmessung

Nachdem das Verhältnis v bestimmt worden war, das zwischen der Beleuchtungsstärke an der Stelle des Filters F und an derjenigen der Scheibe μ bestand, wurden die Messungen so ausgeführt, daß gleichzeitig subjektiv photometriert und die Lichtkurve oszillographiert wurde. Aus dem bekannten Verhältnis v der Beleuchtungsstärken einerseits und aus der bekannten Eichung der Aufnahmeapparatur anderseits konnte dann der Vergleich zwischen den subjektiv gemessenen und den objektiv registrierten Werten erfolgen. Die Gesamtheit der Versuche setzte

sich also zusammen aus der Eichung des Photometers für die verschiedenen Farben, der analogen Eichung der Aufnahmeapparatur, der Bestimmung des schon erwähnten Verhältnisses v der Beleuchtungsstärken und schließlich den eigentlichen Messungen.

Es wurden folgende von der Firma Osram hergestellte Gasentladungslampen untersucht:

Natriumrohr . . .	220 V	1,15 A	70 W
Quecksilber-Hochdruckrohr	220 V	2,70 A	500 W
Neonrohr	380 V	6,00 A	

Bei den Röhren diente als Strombegrenzer einmal ein Ohmscher Widerstand und dann eine Drosselspule (beim Neonrohr ein Streufeld-Transformator 220/380 V). Der Strom wurde in beiden Fällen auf den gleichen Wert eingestellt und während der Messung konstant gehalten. Bei der Eichung des Photometers und der Aufnahmeapparatur wurden das Natrium- und das Quecksilberrohr mit Gleichstrom betrieben.

Zur Eichung des Photometers Ph (eines Sektorenphotometers der Firma Schmidt & Haensch) wurde zunächst die Lichtstärke des Leuchtrohres bestimmt; daraus und aus der Entfernung zwischen Photometer und Leuchtrohr ergab sich die Eichung in Skalenteilen pro Lux. Bei der Bestimmung der Lichtstärke diente als Vergleichslampe eine geeichte Projektionslampe der Farbtemperatur 2000 ° K. Ihre Strahlung wurde durch ein geeichtes Filter physiologisch der Farbe des Leuchtrohres angepaßt; dasselbe geschah natürlich auch mit der im Photometer Ph enthaltenen Vergleichslampe.

Die Bestimmung des Verhältnisses v wurde nun mit Hilfe des geeichten Sektorenphotometers für jedes Leuchtrohr einzeln ausgeführt. Diese Faktoren waren bei den einzelnen Röhren verschieden, da sowohl ihre Längen wie auch ihre Entfernungen von der Spiegelglasscheibe S verschieden waren,

während die Entfernungen zwischen F und S und zwischen μ und S unverändert blieben. Die Eichung der Aufnahmeapparatur ergab sich dann bei den eigentlichen Messungen unter Benutzung der Werte v aus den Lichtverhältnissen, die beim Gleichstrombetrieb der Röhren herrschten.

An der Stelle F wurden folgende Filter benutzt: bei der Natriummessung ein Flüssigkeitsfilter [Schichtdicke 1 cm, Zusammensetzung (48): 60 g Kupferchlorid, 14,5 g Kobaltammoniumsulfat, 1,9 g Kaliumbichromat, 18 ccm Salpetersäure (1,05), mit Wasser auf 1 Liter aufgefüllt], dessen Durchlässigkeitsgebiet zwischen 5000 und 6400 Å liegt mit dem Maximum bei 5600 Å. Es läßt im wesentlichen nur die D-Linien durch, die ultrarote Strahlung wird völlig absorbiert. Für die Quecksilbermessung wurde ein Schott-Filter gewählt, VG 2, 0,5 mm, dessen Durchlässigkeit zwischen 4100 und 7000 Å liegt mit dem Maximum bei 5150 Å. Bei der Emission des Quecksilber-Hochdruckrohres kann der Einfluß der zeitlichen Verschiebung der einzelnen Linien nicht sehr erheblich sein, weil sich die Gesamtemission aus einer großen Zahl von Linien zusammensetzt (36) und weil nicht anzunehmen ist, daß der erwähnte Effekt bei allen Linien in gleichem Sinne wirkt. Es wurde aber wegen der großen Ultraviolett-Empfindlichkeit der Zelle darauf geachtet, daß die intensiven ultravioletten Linien (die Resonanzlinie und die Linien der ersten Nebenserie des Triplettsystems) nicht mit zur Bewertung kamen. Bei Neon, wo ebenfalls ein sehr linienreiches Spektrum vorliegt, wurde auf ein Filter ganz verzichtet. Die ultraroten Linien entstammen hier fast alle der ersten Nebenserie ($2\,P - m\,D$) (49, 50), und ihre Intensität hat an der Gesamtemission nur einen Anteil in der Größenordnung von 10%.

Als Resultate sind zunächst die Oszillogramme zu nennen. (Es sei bemerkt, daß zu den fünf Ablesungen eines Beobachters ein Oszillogramm gehört, das gleichzeitig mit der dritten Einstellung

aufgenommen wurde.) Abb. 9 und 10 zeigen je eine charakteristische Aufnahme an einem Natriumrohr, 9 bei Drossel-, 10 bei Widerstandsbetrieb. Man erkennt, daß beim Drosselbetrieb die Kurven größere Flächen einschließen. Beim Widerstandsbetrieb tritt eine Dunkelpause auf, deren zeitliche Größe etwa 10% der Halbwelle beträgt. Diese Dunkelpause erklärt sich aus einer gleich großen Strompause, die zwischen dem Verlöschen und der Wiederzündung des Rohres verstreicht. Beim Drosselbetrieb tritt diese Dunkelpause infolge der Phasenverschiebung zwischen Netzspannung und Rohrstrom nicht auf [vgl. H. Ewest (51)]. In bezug auf die Lichtemission ist sicher der Drosselbetrieb auch aus diesen Gründen günstiger.

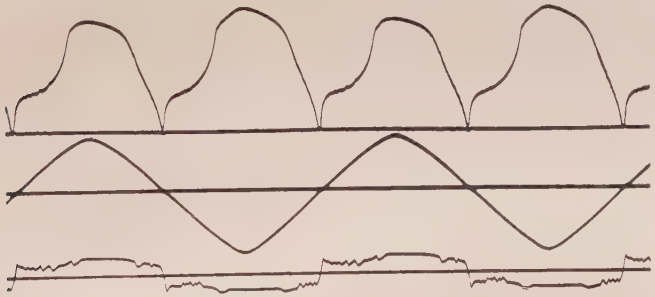


Abb. 9. Lichtverlauf eines Natriumrohres bei Drosselbetrieb

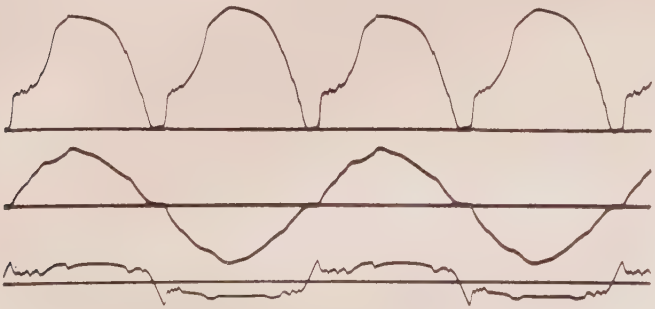


Abb. 10. Lichtverlauf eines Natriumrohres bei Widerstandsbetrieb

Abb. 11 und 12 zeigen die analogen Verhältnisse für ein Quecksilber-Hochdruckrohr. Hier treten in keinem Falle bei einer der Kurven, sei es Strom-, Spannungs- oder Lichtverlauf, abrupte Änderungen auf; alle Übergänge erfolgen stetig. Auch hier ist die Lichtmenge beim Drosselbetrieb größer als die beim Widerstandsbetrieb. Die Lichtkurven zeigen hier trotz ihres ähnlichen Charakters ganz bemerkenswerte Unterschiede. Bei Betrieb an Drossel ist die Lichtkurve breiter über die Halbwelle verteilt, bei Widerstand ist sie schmaler, erreicht höhere

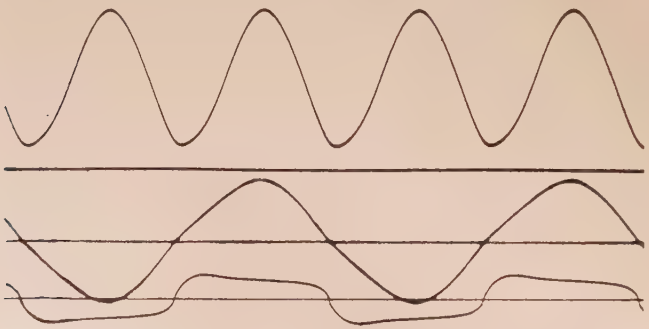


Abb. 11. Lichtverlauf eines Quecksilber-Hochdruckrohres bei Drosselbetrieb

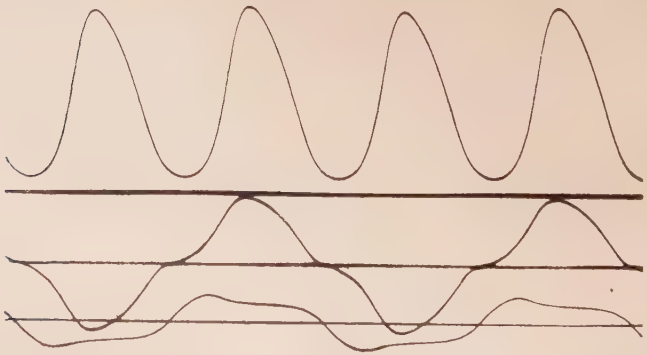


Abb. 12. Lichtverlauf eines Quecksilber-Hochdruckrohres bei Widerstandsbetrieb

Amplituden und nähert sich mehr und länger der Null-Linie. Während das Verhältnis der Flächen bei Drossel und Widerstand den Wert 1,04 hat, zeigt das der Maximalamplituden 0,87.

An den Kurven des Neonrohres (Abb. 13 und 14) erkennt man eine starke Unsymmetrie der beiden Halbwellen. Sie tritt in Abb. 13 nicht nur in der Licht-, sondern auch in der Stromkurve auf. Beim Widerstandsbetrieb ist sie wesentlich geringer und äußert sich darin, daß die Dunkelpausen verschieden lang sind. Wenn man von der Dunkelpause absieht, ist der Lichtverlauf qualitativ in beiden Fällen gleich. Die Spannungskurve zeigt beide Male einen

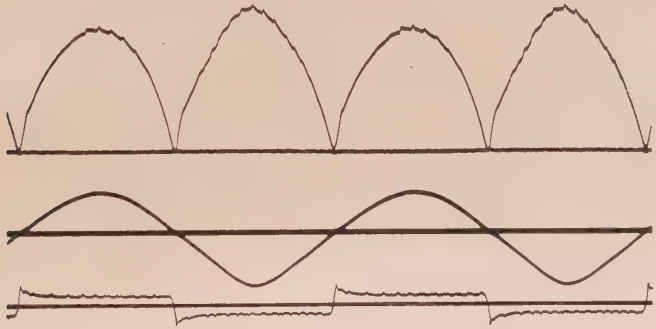


Abb. 13. Lichtverlauf eines Neonrohres bei Drosselbetrieb

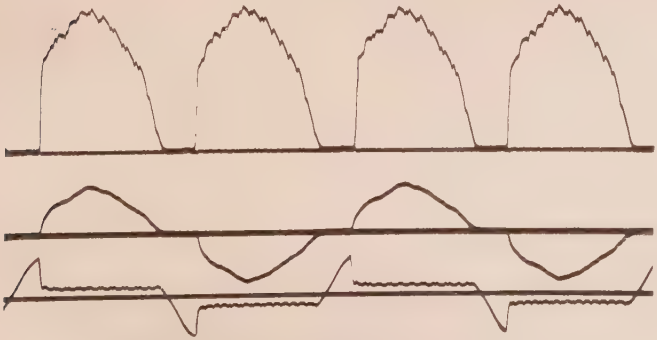


Abb. 14. Lichtverlauf eines Neonrohres bei Widerstandsbetrieb

für eine Niederdruckentladung ganz charakteristischen Verlauf (52): nachdem die Entladung gezündet hat, stellt sich die Spannung auf einen praktisch konstanten Wert ein, der bis zum Ende der Halbwelle andauert. Bemerkenswert ist beim Widerstandsbetrieb die im Vergleich zur Brennspannung außerordentlich hohe Zündspannung, die eine ziemlich lange Dunkelpause (etwa 0,2 Halbwellendauer) mit sich bringt.

Um das ruhige Brennen der Röhren nicht durch den Nebenschluß zu beeinflussen, den der Stromkreis der Spannungsschleife darstellt, war bei den Aufnahmen des Lichtverlaufs diese Schleife stets abgeschaltet, und die Spannungskurve wurde zusammen mit der Null-Linie des Lichtes aufgenommen. Die in Abb. 13 und 14 erscheinenden kleinen Zacken in der Null-Linie des Lichtes rühren von einer induktiven Beeinflussung des Entladungsrohres auf den Verstärker her; man erkennt, daß sie keinen Einfluß auf die Genauigkeit des Planimetrierens haben können.

Die Messungen wurden nun folgendermaßen ausgewertet. Die Lichtflächen wurden mit dem Planimeter ausgemessen, und zwar wurde wegen der Unsymmetrie der Röhren stets die Summe der Flächen zweier benachbarter Halbwellen in die Rechnung eingesetzt. Diese Fläche (in qcm), dividiert durch die Länge der Zeitachse einer Periode (in cm), ergibt die mittlere Amplitude (in cm), die das Auge nach der Aussage des Talbotschen Gesetzes bewerten müßte. Diese mittlere Amplitude kann unter Berücksichtigung der Schleifenempfindlichkeit (6,5 cm pro 100 mA) auch in mA ausgedrückt werden. Anderseits kennt man aus der Ablesung des Photometers Ph und aus dem Verhältnis v die Beleuchtungsstärke, der diese mittlere Amplitude entspricht. Der Quotient dieser beiden Werte (in Lux/mA), der sich beim Wechselstrombetrieb des Leuchtrohres ergibt, wird nun mit demselben Quotienten für Gleichstrombetrieb (Eichfaktor der Auf-

nahmeapparatur) verglichen; und bei Gültigkeit des Talbotschen Gesetzes muß das Verhältnis dieser beiden Quotienten den Wert 1 ergeben.

Die hier skizzierte Rechnung ist in den folgenden Tabellen VII, VIII und IX ausgeführt. In der ersten Spalte steht die Zahl der am Photometer Ph abgelesenen Skalenteile, in der zweiten ist die Beleuchtungsstärke E_F an der Stelle F gegeben, berechnet aus P, C und v; C ist der Eichfaktor des Photometers (in Skt/Lux). Die dritte Spalte enthält die aus den Oszillogrammen ermittelte mittlere Amplitude (in mA), die vierte enthält die oben erwähnten Quotienten, gebildet aus den Werten der zweiten und dritten Spalte. In der ersten Zeile stehen die Werte für Drossel-, in der zweiten die für Widerstandsbetrieb. In der fünften Spalte sind die Quotienten der Drossel- und Widerstandsmessung auf den Eichfaktor A bezogen. Bei der Bestimmung dieses Eichfaktors wurde der Ausgangsstrom der Aufnahmeapparatur direkt am Milliamperemeter abgelesen.

Die Eichfaktoren A stellen die Empfindlichkeit der Apparatur für die verschiedenen Farben dar; sie gelten für die Zelle mit dem Filter davor. Daraus erklärt sich die außerordentlich viel geringere Empfindlichkeit bei Quecksilberlicht im Vergleich zu Natrium und Neon. Das Filter läßt von den stärksten Linien des Quecksilberspektrums der Hochdruckentladung [Angabe nach (35)] nur die Linien 5461 Å und 5770/90 Å fast ungeschwächt durch. Bei Neon muß sich naturgemäß die größte Empfindlichkeit ergeben, weil die stark rotempfindliche Zelle ohne Filter benutzt wurde. Die Neonmessungen hatten nicht mit Gleichstrom durchgeführt werden können, weil keine entsprechend dimensionierte Stromquelle (380 V, 6 A) vorhanden war. So ist in der letzten Spalte der Tabelle IX nur der Prozentsatz angegeben, um den sich die scheinbaren Empfindlichkeitswerte voneinander unterscheiden.

Tabelle VII

Natrium

A = 13,0 Lux/mA; C = 1,27 Skt/Lux; v = 21,9

	P	E_F	mA	Lux/mA	
Dr	28,8	497	36,9	13,5	1,04
Wi	27,7	478	36,4	13,1	1,01

Tabelle VIII

Quecksilber-Hochdruck

A = 111,2 Lux/mA; C = 8,45 Skt/Lux; v = 68,0

	P	E_F	mA	Lux/mA	
Dr	67,5	5440	48,1	113,0	1,02
Wi	59,4	4785	41,2	115,8	1,04

Tabelle IX

Neon

C = 4,47 Skt/Lux; v = 49,1

	P	E_F	mA	Lux/mA	
Dr	35,0	384	44,3	8,67	3,7%
Wi	32,4	356	39,6	8,99	

In den letzten Spalten der Tabellen VII und VIII sind die bei den jeweiligen Betriebsarten erhaltenen Eichfaktoren bezogen auf diejenigen der Gleichstromeichung. Diese Quotienten geben, sofern sie nicht gleich 1 sind, die scheinbare Abweichung vom Talbotschen Gesetz an. Die Abweichungen bleiben aber durchweg im Rahmen der zu erwartenden Ungenauigkeit (vgl. S. 16).

Das aus diesen Messungen folgende Ergebnis ist die Tatsache, daß die Gültigkeit des Talbotschen Gesetzes im Rahmen der Meßgrenzen der benutzten Anordnung auch für die Emissionsverhältnisse von Leuchtröhren bestätigt wurde, die unter verschiedenen Bedingungen mit 50periodigem Wechselstrom betrieben wurden.

D. Zusammenfassung

In dieser Arbeit sollte untersucht werden, ob die Gültigkeit des Talbotschen Gesetzes auch unter den extremen Bedingungen, wie sie bei Gasentladungslampen auftreten, noch besteht. Hierfür wurde eine objektive Meßmethode entwickelt, bei der der Lichtverlauf oszillographisch registriert wird und die von der Lichtkurve eingeschlossene, mit dem Planimeter ermittelte Fläche ein Maß für den zu messenden Lichtstrom darstellt; die Ergebnisse dieser objektiven Methode wurden mit Werten verglichen, die sich aus einer gleichzeitig erfolgenden subjektiven photometrischen Messung ergaben. Solche Messungen wurden an weißem Licht und an Leuchtröhren vorgenommen.

Das Ergebnis war, daß sowohl bei weißem Licht wie bei Leuchtröhren keine Abweichungen vom Talbotschen Gesetz nachgewiesen werden konnten, die die Meßgenauigkeit überschritten hätten.

Diese Untersuchungen entstanden zum großen Teil im Lichttechnischen Laboratorium der Firma Osram, eine Reihe wesentlicher ergänzender Messungen wurde im Beleuchtungstechnischen Institut der Technischen Hochschule, Berlin, unter Leitung von Herrn Prof. Dr.-Ing. W. Arndt ausgeführt. Herrn Dr. Reeb, von dem die Anregung zu dieser Arbeit stammt, und Herrn Prof. Arndt möchte ich auch an dieser Stelle meinen Dank für ihr förderndes Interesse an dieser Arbeit und für zahlreiche wertvolle Ratschläge aussprechen. Zu besonderem Dank bin ich der Firma Osram verpflichtet, die die Mittel für diese Untersuchungen zur Verfügung stellte.

E. Literatur und Zitate

1. A. Kohlrausch, Licht und Lampe *12*, 1923, 555—560.
2. Müller-Pouillets Handbuch der Physik, II, Optik, 2, 1; S. 542—547.
3. J. W. T. Walsh, Photometry, Constable a. Comp. Ltd., London 1926, S. 235—268.
4. H. König, ATM, Lieferung 43, Jan. 1935, V 422, Blatt 6, 7.

5. W. Dziobek, O. Reeb, Phys. Zs. *35*, 1934, 545.
6. H. F. Talbot, Brewster Phil. Mag. *5*, 1834, 327.
7. J. Plateau, Bull. Ac. Roy. d. Sciences, Bruxelles, *2*, 1835, 52, 89.
8. J. Plateau, Pogg. Ann. d. Phys. *35*, 1835, 457.
9. H. König, Helv. Phys. Acta 7, 1934, 427, und E. Brodhun, Ergebn. d. Exakt. Naturw. *6*, 1927, 246, weisen darauf hin, daß die verschiedenen Methoden der heterochromen Photometrie nicht immer ganz übereinstimmende Resultate geben. Es konnte in letzter Zeit von R. G. Weigel, Licht *5*, 1935, 15, 43, 71 gezeigt werden, daß unter gewissen Vorsichtsmaßregeln einige von ihnen gleichwertige Resultate liefern. Doch besteht nach E. Brodhun das bestbewährte Mittel zur Erleichterung heterochromer Messungen und zur Umgehung der genannten Schwierigkeiten in der Verwendung von Farbfiltern.
10. M. Pirani, Zs. f. Beleuchtungswesen, Heizungs- und Lüftungstechnik, 1915, 41.
11. H. von Helmholtz, Handbuch der Physiologischen Optik, 3. Aufl., Bd. 2, 174.
12. W. Dziobek, Gehrckes Handb. d. Physikal. Optik, Bd. 1, 7.
13. A. Tschermak, Handb. d. norm. u. patholog. Physiologie, Receptionsorgane II, Photoreceptoren, 1. Teil, 1929, 438.
14. O. Lummer, E. Brodhun, Zs. f. Instrk. *16*, 1896, 299.
15. E. Wiedemann, J. B. Messerschmitt, Wied. Ann. *34*, 1888, 463.
16. J. W. Beams, Opt. Soc. of Am., Program of the 19. Annual Meeting, Nat. Bur. of Standards, Washington, Octob. 18 to 20, 1934.
17. G. N. Stewart, Proc. Roy. Soc. Edinburgh *15*, 1887/88, 441.
18. F. Exner, Sitzungsber. Wiener Ak. d. Wiss. *127*, 1918, IIa, 1829.
19. E. P. Hyde, Bull. of the Bur. of Stand. *2*, 1906, 1.
20. Cady, Illum. Eng. Soc. 1921, 16.
21. E. Haschek, Sitzungsber. Wiener Ak. d. Wiss. *138*, 1929, IIa, 17.
22. E. Haschek, daselbst, *137*, 1928, IIa, 513. — Haschek nimmt an, daß in der Netzhaut des Auges Sehstoffsysteme enthalten sind, die unter dem Einfluß der einfallenden Strahlung zu Resonanzschwingungen angeregt werden. Werden die Amplituden dabei so groß, daß der molekulare Zusammenhang zerstört wird, dann wird die Sehempfindung ausgelöst; nur durch den Zerfallsprozeß also, und nicht durch die Zerfallsprodukte werden die Sehnerven gereizt. Er berechnet mit diesem mechanischen Modell die Wirkung intermittierenden Lichtes auf das Auge und erhält für höhere Frequenzen, daß die Empfindlichkeit während der Dunkelpause um weniger zunimmt als sie während der gleich langen Dauer der

Lichtwirkung abgenommen hat; das bedeutet die Ungültigkeit des Talbotschen Gesetzes für hohe Frequenzen. — Die Haschekschen Vorstellungen über die Sehstoffsysteme sind nicht in Einklang zu bringen mit neueren Messungen von

23. G. v. Studnitz, Naturw. *22*, 1934, 193. — Dieser findet aus Versuchen an verschiedenen tierischen Netzhäuten, daß es nicht nur in den Stäbchen eine durch Belichtung zerstörbare Substanz, den Sehpurpur, gibt, sondern daß auch die Zapfen eine photochemisch empfindliche Substanz enthalten, die farblos ist und farblose Zerfallsprodukte hat; infolge ihrer Farblosigkeit sei sie bisher der Beobachtung entgangen. Sie zerfällt bei Belichtung rascher als der Sehpurpur, und ihr Absorptionsmaximum ist gegenüber dem des Sehpurpurs um etwa 500 Å nach längeren Wellen zu verschoben, was sehr gut im Einklang mit der Duplizitätstheorie steht. Bei der Zersetzung der Zapfensubstanz durch Belichtung entsteht Phosphorsäure, und diese ruft die bekannten Vorgänge in der Netzhaut hervor: Zapfenkontraktion und Pigmentvorwanderung. Eine Alkalisierung der Retina, wie sie bei Verdunkelung des Auges durch Synthese aller Zerfallsprodukte zu Zapfensubstanz eintritt, bewirkt bei belichtetem Auge Zapfenstreckung und Pigmentretraktion, also die Vorgänge, die sich bei der Erholung des Auges im Dunkeln vollziehen.
24. A. Dresler, M. Goldmann, O. Reeb, Licht *3*, 1933, 228.
25. W. Grundmann, L. Kaßner, Phys. Zs. *35*, 1934, 16. — O. H. Knoll, Das Licht *5*, 1935, 167.
26. R. Sewig, Zs. f. Phys. *76*, 1932, 91.
27. W. Kluge, Zs. f. techn. Phys. *16*, 1935, 184.
28. H. Krefft, M. Reger, R. Rompe, Zs. f. techn. Phys. *14*, 1933, 242.
29. H. Krefft, Zs. f. Phys. *77*, 1932, 752.
30. H. Krefft, M. Pirani, R. Rompe, Techn.-Wiss. Abhandl. a. d. Osram-Konzern, Bd. 2, 1931, 24.
31. R. Rompe, daselbst, Bd. 3, 1934, 44.
32. M. J. Druyvesteyn, Phys. Zs. *33*, 1932, 822.
33. M. J. Druyvesteyn, N. Warmoltz, Phil. Mag., Ser. 7, *17*, 1934, 1.
34. W. de Groot, Physica *12*, 1932, 289.
35. W. de Groot, Physica *1*, 1933, 28.
36. H. Krefft, M. Pirani, Zs. f. techn. Phys. *14*, 1933, 393. — Setzt man die Intensität der D-Linien gleich 100 %, dann hat das Gebiet 8195/8183 Å eine relative Intensität von 19 %, das bei 11382/11404 Å eine solche von 10 %.
37. H. König, Helv. Phys. Acta *7*, 1934, 427, 433.
38. W. Hofmann, Wiss. Veröfftl. Siemens-Konz. *12*, 1933, 142.
39. A. König, Handbuch d. Exp.-Phys., Bd. 20, 1; S. 141.

40. R. G. Weigel, Licht *1*, 1931, 243, 266.
41. Müller-Pouillets Handb. d. Phys., II, Optik, 2, 1; 1149.
42. J. W. T. Walsh, l. c., 146.
43. E. Brodhun, Handbuch der Physik, Bd. 19, 517. — R. G. Weigel, Das Licht *1*, 1930, S. 25 u. f.
44. F. Uppenborn, Lehrbuch der Photometrie, S. 212.
45. J. W. T. Walsh, l. c., 185.
46. U. Ebbecke, Pflügers Archiv *185*, 1920, 181, 196. — Ebbecke führt Versuche an, bei denen eine helle Fläche durch eine quadratische oder kreisförmige Öffnung eines schwarzen Pappschirmes betrachtet wurde, der sich in einiger Entfernung vom Auge befand. Der intermittierende Lichteindruck wurde durch schnelles Öffnen und Schließen der Augen hervorgerufen oder durch Bewegung der gespreizten Finger vor dem Auge. Ebbecke führt aus: „Trotzdem es noch nicht zu einer völligen Verschmelzung der Lichteindrücke kommt, hat doch die flimmernde Fläche eine deutliche Gesamthelligkeit." Er beobachtet, daß die Flimmerhelligkeit nicht nur größer ist als die nach der Verschmelzung zum kontinuierlichen Eindruck erreichte, sondern sogar größer als die Helligkeit des ohne Unterbrechung auf das Auge einwirkenden Lichtes. — Die letzte Bemerkung kann aus den hier ausgeführten Messungen nicht bestätigt werden.
47. H. von Helmholtz, l. c., 192. — Helmholtz weist auf ähnliche Versuchsergebnisse wie die hier genannten hin, und er gibt für die Erscheinung folgende Erklärung: So oft der Eindruck des Weiß beginnt, steigert sich anfangs die Erregung eine gewisse kurze Zeit bis zu einem Maximum, um nachher durch die allmählich zunehmende Ermüdung wieder abzunehmen. Versuche zeigen nun, daß der nachdauernde Zustand der Ermüdung stets der gleiche ist, ob die Frequenz der Lichteindrücke oberhalb oder unterhalb der Flimmergrenze liegt. Nehmen wir nun an, daß nach dem Vorübergang jedes schwarzen Sektors dieser mittlere Zustand der Ermüdung wiederhergestellt sei, wie er schließlich im Nachbilde andauert, so werden die ersten Momente des eintretenden Weiß den stärksten Eindruck machen. Wird der Eindruck dann abgebrochen, wenn er sein Maximum erreicht hat, machen eben alle Sektoren diesen Maximaleindruck.
48. E. Lax, M. Pirani, Handbuch der Physik, Bd. 19, 430.
49. M. Laporte, Les Phénomènes élémentaires de la Décharge électrique dans les Gaz, Les Presses Universitaires de France, Paris 1933.
50. Paschen-Götze, Seriengesetze der Linienspektren, Springer, Berlin 1922.
51. H. Ewest, Zs. f. techn. Phys. *14*, 1933, 478.
52. H. Ewest, E. O. Seitz, Licht und Lampe *21*, 1932, 234.

Lebenslauf

Ich, Artur Horst Köllner, wurde am 15. Februar 1910 in Bielefeld als Sohn des Sattlermeisters Artur Köllner und seiner Ehefrau Anny, geb. Lehmann, geboren. Nachdem ich ein Jahr die Bürgerschule und drei Jahre die Mittelschule besucht hatte, kam ich auf die Oberrealschule in Bielefeld und später, von Quarta an, in Leipzig, wo ich Ostern 1929 meine Reifeprüfung ablegte.

Ich widmete mich dann dem Studium der Physik und Mathematik, dem ich zwei Semester lang in Leipzig und bis zum Ende in Berlin oblag.

Meine hauptsächlichen Lehrer waren: Debye, Lichtenstein, Schrödinger, von Laue, Czerny, Hettner, Schur.

Nach Beendigung meiner Studien fertigte ich im Lichttechnischen Laboratorium der Firma Osram G. m. b. H., K.-G., und im Beleuchtungstechnischen Institut der Technischen Hochschule Berlin meine Doktorarbeit an.

DRUCK VON
A. SEYDEL & CIE. AKTIENGESELLSCHAFT
BERLIN SW 61.